СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧЕЙ КЛЕТИ СТАНА
ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ*С. Р. РАХМАНОВ¹, канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной механики;**В. В. ПОВОРОТНИЙ², конструктор, npfvostokplus@gmail.com**(¹ Национальная металлургическая академия Украины, Украина, г. Днепр;**² ООО “НПФ “Восток Плюс”, Украина, г. Днепр)*

Аннотация. Эффективность реализации процесса холодной пильгерной прокатки труб (ХПТ) может быть повышена как совершенствованием самого процесса прокатки, так и выбором рациональных параметров базового технологического оборудования и режимов функционирования станов. Особое внимание необходимо уделять повышению надежности функционирования, увеличению быстроходности и производительности станов ХПТ. Приведены результаты системного анализа динамики рабочей клетки стана ХПТ различной конструкции. Разработана расчетная схема и составлены дифференциальные уравнения движения элементов рабочей клетки стана ХПТ. Получены картины динамических перемещений для выбранных элементов рабочей клетки стана ХПТ. Анализ теоретических исследований показал, что для стабилизации динамики базовых узлов клетки необходимо повышение жесткости соответствующих элементов рабочей клетки. Показано, что повышение жесткости клетки достигнуто выполнением в станине продольной перемены толщины, связывающей внутреннюю и наружную оболочки конструкции. Разработано нажимное устройство валков оптимальной структуры, внедрение которого позволяет более эффективно вести технологический процесс, так как элементы устройства могут приспосабливаться ко всем возможным неточностям изготовления рабочей клетки и монтажа, а также к деформациям стоек станины. Установлено, что нажимное устройство валков оптимальной структуры, кроме всего, выполняет роль предохранительного устройства рабочей клетки стана ХПТ. Исследованиями выявлено, что увеличение производительности и повышение качества производимой продукции преимущественно достигнуто путем использования на стане ХПТ 32 рабочей клетки рациональной конструкции. Восьмилетняя промышленная эксплуатация усовершенствованного варианта конструкции рабочей клетки для прокатки труднодеформируемых сталей и сплавов подтверждает ее высокую эффективность в работе при производстве прецизионных высококачественных труб.

Ключевые слова: холодная прокатка труб, рабочая клетка, производство прецизионных высококачественных труб, стан холодной пильгерной прокатки, нажимное устройство валков, жесткость клетки.

Ссылка для цитирования: Рахманов С.Р., Поворотний В.В. Системная динамика элементов рабочей клетки стана холодной пильгерной прокатки труб // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 6. С. 725–734.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-6-725-734

SYSTEM DYNAMICS OF A PIPE PILGER CRM WORKING STAND

*S.M. RAKHMANOV¹, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt “Applied mechanics”;**V.V. POVOROTNIY², designer, npfvostokplus@gmail.com**(¹ National Metallurgical Academy of Ukraine, Ukraine, Dnepr;**² OJSC NPF “Vostok Plus”, Ukraine, Dnepr)*

Abstract. Efficiency of the pilger cold rolling of pipes process realization can be increased both by perfection of the rolling process and by a selection of rational parameters of the base technological equipment and the mills functioning regimes. Particular attention should be paid to the increase of reliability of functioning, increase of high-speed and productivity of pipe cold rolling mills (CRMs). Results of the system analysis of dynamics of pipe CRM working stand of various designs presented. A calculation algorithm elaborated and differential equations of the pipe CRM working stand obtained. Pictures of dynamic motions for selected pipe CRM working stand obtained. The analysis of theoretical studies showed, that for stabilization of the stand base elements it is necessary to increase the rigidity of the working stand correspondent elements. It was shown, that the stand rigidity increase reached by arrangement longitudinal bridge of variable thickness, connecting the internal and external structure casing. An optimal design roller actuator elaborated. Implementation of the actuator will enable to accomplish the technological process more effectively, since the unit elements can adopt all possible inaccuracy of the working stand manufacturing and assembling, as well as housing post deformation. It was ascertained, that the roller actuator of optimal design, above all, plays a role of an emergency gear of the pipe CRM working stand. The studies revealed that increase of productivity and quality of the manufactured products reached mainly by application of the working stand of rational design at the pipe CRM. The industrial running the modified variant of working stand

design during eight years to roll hard-deformed steels and alloys confirm its high efficiency at production of precision high quality pipes.

Key words: cold rolling of pipes, working stand, production of precision high quality pipes, pilger cold rolling mill, roller actuator, stand rigidity.

For citation: Rakhmanov S.P., Povortniy V.V. System dynamics of a pipe pilger CRM working stand // Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 2019. Vol.75. No. 6, pp. 725–734. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-6-725-734

Современное производство труб методом холодной пильгерной прокатки (ХПТ) характеризуется растущими темпами технологических процессов, т. е. повышением скоростей и силовых воздействий на обрабатываемый продукт.

Отметим, что эффективность реализации процесса ХПТ может быть повышена не только путем совершенствования самого процесса, но и в значительной мере выбором рациональных параметров базового технологического оборудования и режимов функционирования самих стан-ов ХПТ. Следовательно, при этом особое внимание необходимо уделять возможности повышения надежности функционирования, увеличению быстроходности и производительности стан-ов ХПТ.

Постановка задачи. Разработка основных концепций реконструкции рабочих клеток, обеспечивающих повышение их эксплуатационной прочности и качества прокатываемых труб при одновременном снижении металлоемкости, является актуальной задачей, от решения которой во многом зависит расширение технологических возможностей и повышение эффективности стан-ов ХПТ.

Увеличение производительности стан-ов ХПТ может быть достигнуто путем снижения массы возвратно-поступательно перемещающейся рабочей клетки, а повышение качества холоднокатаных труб — путем увеличения ее жесткости и нагрузочной способности в первую очередь базовых элементов — стоек станины, рабочих валков, нажимного устройства и других элементов рабочей клетки [1].

Отметим, что в условиях интенсификации режимов ХПТ, включающей увеличение в сорimente стан-ов удельного веса труб повышенной точности из специальных сплавов, наблюдается резкое снижение долговечности рабочих клеток. В большинстве это обусловлено действием значительных по величине и часто изменяющихся во времени знакопеременных динамических нагрузок. В результате этого из-за усталостного разрушения выходят из строя ответственные элементы рабочей клетки, в частности стойки самой станины и рабочие валки, несмотря на значительные запасы их статической прочности.

Состояние вопроса. Результаты ряда основополагающих исследований, направленных на изучение особенностей процессов ХПТ и динамики функционирования рабочей клетки стан-ов ХПТ, изложены в работах М.И. Гриншпуна,

Ю.Ф. Шевакина, Ф.С. Сейдалиева, В.И. Соколовского, С.Н. Кожевникова, А.С. Ткаченко, М.В. Попова, В.А. Кашкарева, С.М. Крышина и других. Данные исследования определили базовые предпосылки, на основе которых были выработаны главные направления по созданию и усовершенствованию основного оборудования стан-ов ХПТ, в частности элементов базовой компоновки рабочей клетки.

При комплексной модернизации рабочих клеток стан-ов ХПТ необходимо принимать во внимание как количественную сторону режимов интенсификации технологических процессов, так и качественные показатели готовых труб. При этом данная задача приобретает особую важность при производстве холоднокатаных труб из особо труднодеформируемых сталей и специальных сплавов.

В этой связи требуется изыскание конструкции рабочей клетки стана ХПТ, функционирование которой могло бы обеспечить решение указанных выше задач. Отметим, что при создании конструкции рабочей клетки стана ХПТ необходимо обратить внимание на установление влияния рациональной формы станины клетки на возможность уменьшения ее массы при одновременном повышении несущей способности и жесткости конструкции, на возможность выбора оптимальной компоновки элементов рабочей клетки, установки валков, структуры нажимного устройства и другие вопросы.

Основные результаты исследований станины рабочей клетки стана, в которой сочетаются высокая прочность и минимальная масса, были положены в основу при проектировании новой рабочей клетки стана ХПТ [1].

На особенности функционирования рабочей клетки в производственных условиях влияет ряд факторов, которые трудно учесть при аналитическом исследовании из-за необходимых допущений, неизбежных при рассмотрении сложных схем конструкции и вида нагружения стана. Поэтому были выполнены соответствующие исследования рабочей клетки стан-ов ХПТ, проведена и оценена эффективность применения рациональной рабочей клетки с применением информационных технологий.

Метод решения задачи. Решение задач по определению рациональных параметров рабочей клетки стана ХПТ предусматривает прежде всего установление величины и характера на-

грузки, возникающей при взаимодействии станины с обрабатываемой трубной заготовкой [1].

При конструировании стоек станины в данном предположении принято, что граничная точка сопряжения поперечины и стойки станины фиксирована, а вторая выбирается исходя из условий минимизации сформированного функционала нагрузки [2, 3].

Функция образующей стоек станины, представляющая собой решение уравнения Эйлера, соответствует экстремали силового функционала. Среди всех кривых, изображающих образующую стойки станины, требуется найти ту, использование которой приводит к минимуму их деформации. Из множества кривых образующей стоек станины требуется выбрать одну кривую, проходящую через заданную точку сопряжения и удовлетворяющую условиям гладкого сопряжения конца поперечины и начала стойки станины. Достигается это определением частных значе-

ний произвольных постоянных в составе общего решения уравнения Эйлера [4]. Точное решение задачи является достаточно громоздким с математической точки зрения и в ряде случаев неприемлемым. Отметим, что инженерная методика определения параметров стойки станины, ее уравнение, как правило, не является самым простым, но в данном случае имеет достаточно упрощенный вид, что весьма эффективно при проектировании как модельной оснастки, так и при изготовлении самой станины.

Рабочая клеть стана ХПТ состоит из станины, в раме которой смонтированы нажимное устройство, рабочие валки с калибрами в виде полу-дисков или с кольцевыми калибрами, установленные на подшипниках в подушках (рис. 1). Подушки верхнего и нижнего валков предварительно фиксируются в окне станины верхними и нижними планками, а затем поддерживаются клиньями нажимного устройства.

Рис. 1. Рабочая клеть стана ХПТ рациональной конструкции и повышенной жесткости:
1 — валок с калибрами; 2 — подушка; 3 — станина; 4 — пластины регулировочные; 5 — шатун; 6 — ползун;
7 — нажимное устройство; 8 — наделка; 9 — перемычка

Fig. 1. The working stand of the pipe cold rolling mill of rational design and increased rigidity:
1 — the roller with a gauge; 2 — chock; 3 — frame; 4 — adjusting plates; 5 — coupler; 6 — slider; 7 — actuator;
8 — insertion; 9 — cross piece

Станина представляет собой пространственную конструкцию, содержащую две соединенные связями овалообразные рамы рациональной формы, каждая из которых образована внутренней и наружной оболочками, сопряженными вертикальной продольной перемычкой переменной толщины, включая на секторных углах в 120 град. верхнюю и нижнюю поперечины, сочленен-

ные между собой стойками рациональной формы. На уровне оси прокатки стойки станины имеют выборки с отверстиями для присоединения шатунов приводного механизма и штоков уравновешивающего устройства.

Для установки рабочей клетки в станине стана в нижней части по обе стороны клетки расположены два ползуна, выполненные в виде опорных

и боковых направляющих по всей рабочей длине. Вследствие появления возможности регулировки зазоров в проемах станины стана повышается ремонтпригодность, устойчивость и плавность движения клетки, уменьшается износ опорных направляющих, к которым крепятся текстолитовые наделки.

Направляющие опоры рабочей клетки объединены с нижней связью станины в пространственную решетчатую систему — опоры и ребра связи соединены поперечными дополнительными элементами жесткости.

Благодаря данному исполнению конструкция рабочей клетки стана ХПТ имеет оптимальную форму и способна выдержать большие технологические нагрузки. Опыт промышленной эксплуатации рабочей клетки стана ХПТ 32 со станиной рациональной конструкции и установкой валков с кольцевыми калибрами показывает, что конструкция выдерживает 5–6-кратную перегрузку по давлению металла на валки, а снижение массы клетки на 12–14 % приводит к пропорциональному уменьшению динамических нагрузок.

Верхняя связь боковых рам выполнена с учетом возможности ее использования при монтаже нового нажимного устройства в установку рабочей клетки стана ХПТ.

Нажимное устройство рабочих валков [3, 5] содержит клиновой и винтовой механизмы. Клиновой механизм снабжен клиньями, перемещающимися по наклонным контактным поверхностям подушек, двумя парами компенсирующих самоустанавливающихся вкладышей с цилиндрическими поверхностями, оси которых установлены на клиньях, параллельны продольной оси станины стана. Оси других вкладышей контактируют со станиной, параллельны оси рабочего валка.

Индифферентность опор верхнего валка к деформациям в процессе прокатки труб обеспечивает равномерное нагружение подшипников верхних подушек и по мере их износа последние смещаются вдоль оси валка навстречу друг другу под действием горизонтальных составляющих сил реакций со стороны клиньев, обеспечивая выбор появляющихся зазоров. При этом также уменьшается осевое смещение валков относительно друг друга и искажение профиля калибра.

В ряде исследований станов ХПТ [2, 6, 7] отмечено, что в процессе прокатки в подвижном очаге деформации контактное взаимодействие системы валки – обрабатываемое изделие формируется определенным образом в зависимости от величины поворота и подачи заготовки. Кроме вертикальных перемещений, определяемых податливостью системы валки – подушки валков – узлы предохранительных устройств – рама клетки

рабочие валки осуществляют горизонтальные (вдоль собственной оси) перемещения, определяемые податливостью системы крепления подушек валков в окнах рам конструкции клетки. Совершая данные перемещения, рабочие валки с калибрами искажают мгновенное сечение очага деформации. Особенно существенны эти искажения в условиях подвижного очага деформации в соответствующих зонах, где окончательно формируются заданные геометрические характеристики готового изделия.

Процесс прокатки труб в ряде случаев сопровождается нарушениями технологических режимов (обрыв оправки), что вызывает значительные перегрузки по силе прокатки. При этом нажимное устройство играет роль предохранительного устройства. Тогда клиновой механизм с двумя парами компенсирующих самоустанавливающихся вкладышей с цилиндрическими поверхностями перемещается по наклонным контактным поверхностям подушек параллельно оси валков, беспрепятственно пропускает оправку с трубой вдоль оси прокатки.

Следует подчеркнуть, что данный проект рациональной рабочей клетки реализован на десяти станах ХПТ 32 ряда отечественных заводов. Внедрение промышленных образцов рабочей клетки стана ХПТ 32 потребовало изучения их реального деформированного состояния и эффективности работы в целом. При этом проверялась достоверность основных теоретических положений, изложенных в данной работе.

Отметим, что при определенных условиях эксплуатации станов ХПТ элементы станины не будут подвержены действию изгибающих моментов, т. е. будут находиться в условиях одноосного напряженного состояния. Однако на практике конфигурация станины под действием технологической нагрузки деформируется, в результате этого ее элементы в той или иной мере подвергаются изгибу. Для того чтобы свести к минимуму это явление, необходимо определенным образом выбрать образующую стоек станины стана ХПТ.

Проанализируем результаты исследований влияния масс, жесткости и параметров нажимного устройства валков стана ХПТ на пружину и точность прокатываемых труб.

Для проведения комплекса визуализированных исследований был использован программный продукт Solid Works 2, позволяющий моделировать процессы нагружения станины подвижной клетки с учетом определенных ограничений и в реальном поле силовых воздействий со стороны обрабатываемого изделия [4]. Результаты исследования с учетом условий эксплуатации стана ХПТ 32 приведены в таблице.

ЗНАЧЕНИЕ ПРУЖИНЫ КЛЕТИ СТАНА ХПТ 32 ПРИ НАГРУЗКЕ 500 кН НА ВАЛОК

VALUES OF THE STAND SPRING OF THE PIPE CRM 32 UNDER LOAD OF 500 kN PER ONE ROLLER

Узел рабочей клетки	Масса, кг	Статическая деформация, мкм			Жесткость, Н/мм
		минимальная	средняя	максимальная	
Клин нажимного устройства	9,75	0,13	1,14	3,19	$0,43 \times 10^{12}$
Вкладыш нажимного устройства	15,57	0,29	2,64	20,3	$0,189 \times 10^{12}$
Подушка верхняя в сборе	65,8 + 7,16 + 6,35	7,43	8,2	9,2	$0,54 \times 10^{11}$
Подушка нижняя в сборе	55,89 + 7,16 + 6,35	6,97	7,64	8,56	$0,65 \times 10^{11}$
Подшипник	32,4	—	180	—	$2,7 \times 10^9$
Валок верхний	163/399	26,5	37,6	47	$0,132 \times 10^{11}$
Валок нижний	135/297	26,5	37,6	47	$0,132 \times 10^{11}$
Деформируемая часть станины	480/823	15,4	37,4	52,9	$0,133 \times 10^{11}$
Оправка	2,4	—	47	—	$0,1 \times 10^{11}$

При формировании динамической модели рабочей клетки были приняты необходимые допущения о том, что линия действия равнодействующей сил контактного взаимодействия обра-

батываемого изделия и калибра с валком проходит через ось прокатки, так как обрабатываемое изделие представляет собой осесимметричное тело вращения.

Рис. 2. Трехмерная модель и многомассовая расчетная схема рабочей клетки стана ХПТ 32 рациональной конструкции ООО “НПФ “Восток Плюс”

Fig. 2. Three-dimensional model and multi-mass calculation algorithm for the pipe CRM 32 working stand of OJSC “NPF “Vostok Plus” rational design

Параметры приведенных жесткостей и масс рассматриваемых рабочих клеток конструкции ОАО “Электростальский завод тяжелого машиностроения” (ЭЗТМ) и ООО “НПФ “Восток Плюс” определены из соответствующих картин деформаций базовых компоновок при нагружении механической системы силой прокатки трубы 0,5 МН. Данные исследования выполнены с применением программной продукции в Solid Works в масштабе один к одному согласно существующей и разработанной проектно-технической документации. При этом на элементы станин были наложены соответствующие ограничения, мак-

симально близкие к реальным условиям их эксплуатации, и приложена принятая максимальная технологическая нагрузка в размере 0,5 МН [5].

Трехмерная модель и многомассовая расчетная схема рабочей клетки стана ХПТ 32 рациональной конструкции ООО “НПФ “Восток Плюс” приведена на рис. 2.

При данной расчетной схеме математическую модель для многомассовой механической системы рабочей клетки стана ХПТ в постановке задачи Коши с учетом определенных начальных условий можно представить системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} = -\mu_1 \frac{dx_1(t)}{dt} - C_1 x_1(t) + C_2 (x_2(t) - x_1(t)); \\ m_2 \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} = -\mu_2 \frac{dx_2(t)}{dt} - C_2 (x_1(t) - x_2(t)) + C_3 (x_3(t) - x_2(t)) - P(t); \\ m_3 \frac{d^2 x_3(t)}{dt^2} = -\mu_3 \frac{dx_3(t)}{dt} - C_3 (x_3(t) - x_2(t)) + C_4 (x_4(t) - x_3(t)) + P(t); \\ m_4 \frac{d^2 x_4(t)}{dt^2} = -\mu_4 \frac{dx_4(t)}{dt} - C_4 (x_4(t) - x_3(t)) + C_5 (x_5(t) - x_4(t)); \\ m_5 \frac{d^2 x_5(t)}{dt^2} = -\mu_5 \frac{dx_5(t)}{dt} - C_5 (x_5(t) - x_4(t)) + C_6 (x_6(t) - x_5(t)); \\ m_6 \frac{d^2 x_6(t)}{dt^2} = -\mu_6 \frac{dx_6(t)}{dt} - C_6 (x_6(t) - x_5(t)) + C_7 x_6(t), \end{cases}$$

где $m_i (i = 1, \dots, 6)$ — приведенные массы элементов рабочей клетки; $C_i (i = 1, \dots, 6)$ — приведенные жесткости элементов рабочей клетки; $\mu_i (i = 1, \dots, 6)$ — вязкое сопротивление элементов рабочей клетки; $x_i (i = 1, \dots, 6)$ — динамические перемещения элементов рабочей клетки в вертикальной плоскости, в том числе $x_1(t)$ — перемещения нижней подушки с подшипниками; $x_2(t)$ — перемещения нижнего вала; $x_3(t)$ — перемещения верхнего вала; $x_4(t)$ — перемещения верхней подушки с подшипниками; $x_5(t)$ — перемещения клинового механизма и нажимного устройства; $x_6(t)$ — перемещения стоек и поперечин станины клетки; $P(t) = P_0 + P_1 \sin(\omega t)$ — вертикальная гармоническая составляющая силы прокатки трубы-заготовки частоты ω (P_0 статическое и P_1 амплитудное значение гармонической составляющей силы прокатки).

Исследование функционирования многомассовой динамической модели элементов рабочей клетки стана ХПТ 32 выполнено численно методом Рунге–Кутты в постановке задачи Коши с применением программного продукта Matcad.

Динамические особенности и условия функционирования элементов рабочей клетки станов ХПТ 32 соответствующих конструкций без учета демпфирования деталей механической системы представлены на рис. 3.

Практика эксплуатации рациональной рабочей клетки конструкции ООО “НПФ “Восток Плюс” на станах ХПТ 32 в условиях ряда отечественных заводов показывает высокую надежность и эффективность работы, при которой достигнуты следующие показатели: увеличение производительности стана более чем на 6 %; снижение массы рабочей клетки на 14 %; экономия энергозатрат на 9,23 %; повышение срока службы рабочей клетки при прокатке труднодеформируемых сталей и сплавов фактически в 3,6 раза; повышение качества готовой продукции за счет увеличения жесткости рабочей клетки; применение оптимального нажимного устройства привело к уменьшению брака “накат” на 5 % (все показатели представлены на основании осмотра прокатываемой продукции из стали 12X18H10T размером 20×1,6 и стали X18H10T размером 14×2,0, в соответствии с ГОСТ 9941–81 точность “высокая”, где предельные отклонения геометрических размеров труб равны: по стенке ±5–7 %, по наружному диаметру ±0,10 мм); расширение технологических возможностей стана (прокатка специального сортамента труб — особотонкостенных, изменение существующих маршрутов прокатки с целью уменьшения цикличности обработки).

Рис. 3. *Динамическое состояние элементов рабочей клетки станков ХПТ 32 (Gr.2, маршрут 28×2–19×1):*
 1 — конструкция ОАО ЭЗТМ; 2 — конструкция ООО “НПФ “Восток Плюс”

Fig. 3. *Dynamic state of the pipe CRM 32 working stand (Gr.2, route 28×2–19×1):*
 1 — design of OJSC EZTM; 2 — design of OJSC “NPF “VostokPlus”

В работе [8] приведены результаты исследования влияния различных технологических факторов прокатки труб в станах ХПТ на величину поперечной разностенности труб. В частности, приводятся сведения о том, что жесткость клетки является фактором, способным повлиять на точность труб. Для исследования влияния повышения жесткости клетки на разностенность труб были прокатаны два пакета труб из сплава Gr.2 по маршруту 28×2–19×1 на двух станах ХПТ 32

— один оборудован клетью конструкции ОАО ЭЗТМ, а другой — клетью повышенной жесткости конструкции ООО “НПФ “Восток Плюс”. До и после прокатки была замерена поперечная разностенность вдоль каждой трубы каждого пакета. Результаты анализа изменения параметров разностенности обработаны методами математической статистики и сведены в соответствующие полигоны изменения частот (рис. 4 и 5) абсолютной и относительной разностенности.

Рис. 4. Полигоны изменения частот поперечной разностенности в ходе прокатки трубы из сплава Gr.2 на стане ХПТ 32 со стандартной клетью по маршруту 28×2–19×1:
а — абсолютная разностенность; б — относительная

Fig. 4. Polygon of cross different-walled frequency variation during rolling of pipe of Gr.2 alloy at the pipe CRM 32 with standard stand by the route 28×2–19×1:
а — absolute different-walled; б — relative one

Как видно из полигонов изменения частот поперечной разностенности, при прокатке труб в стане, оснащенном клетью конструкции ОАО ЭЗТМ (см. рис. 4), среднее значение абсолютной разностенности в пакете уменьшилось на 49,02 % (с 0,218 до 0,111 мм). Несмотря на значительное уменьшение средней абсолютной разностенности, величина средней относительной

разностенности в пакете несколько увеличилась (на 0,237 %). Анализ изменения значений поперечной разностенности пакета труб, прокатанного на стане, оснащенном клетью конструкции ООО “НПФ “Восток Плюс” (см. рис. 5), показывает, что среднее значение абсолютной разностенности в пакете уменьшилось на 52,03 % (с 0,207 до 0,099 мм).

Рис. 5. Полигоны изменения частот поперечной разностенности в ходе прокатки трубы из сплава Gr.2 на стане ХПТ 32 с увеличенной жесткостью клетки по маршруту 28×2–19×1:
а — абсолютная разностенность; б — относительная

Fig. 5. Polygon of cross different-walled frequency variation during rolling of pipe of Gr.2 alloy at the pipe CRM 32 with increased rigidity stand by the route 28×2–19×1:
а — absolute different-walled; б — relative one

Выводы

1. Проведен системный анализ динамики рабочей клетки станков ХПТ различной конструкции.
2. Получены уточненные картины динамических перемещений элементов рабочей клетки стана ХПТ 32. Комплексные исследования показали, что для стабилизации динамики рабочих валков с калибрами и повышения жесткости базовых элементов станины необходимо выполнение продольной равнопрочной перемычки, связывающей внутреннюю и наружную оболочки конструкции, переменной толщины.
3. Установлено, что расширение технологических возможностей станков ХПТ 32, повышение их производительности и качества производимой продукции может быть достигнуто путем использования в составе основного оборудования модернизированной рабочей клетки рациональной конструкции.
4. Анализ проведенных теоретических исследований показал, что для повышения равномерности нагружения элементов станины необходимо выполнение продольной перемычки, связывающей внутреннюю и наружную оболочки конструкции станины, переменной толщины.

5. Разработана, изготовлена и внедрена в условиях ООО «ПО «Оскар» усовершенствованная конструкция рабочей клетки на двух станках ХПТ 32 с рациональной компоновкой взаимосвязанных элементов.

6. Разработано, изготовлено и внедрено совмещенное предохранительное нажимное устройство рабочей клетки оптимальной структуры, применение которого позволяет более эффективно вести технологический процесс. Установлено, что элементы нажимного устройства могут приспосабливаться ко всем возможным неточностям изготовления, монтажа и нарушениям технологического режима прокатки труб (срыв оправки со стержня), а также к деформациям стоек станины в ходе прокатки труб.

7. Промышленная эксплуатация усовершенствованного варианта рациональной конструкции рабочей клетки на отечественных заводах (например, в условиях ООО «ПО «Оскар») в течение 8 лет в режиме, характеризуемом в основном жесткими условиями прокатки труднодеформируемых сталей и сплавов, подтверждает ее высокую эффективность в работе при производстве прецизионных высококачественных труб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб. — М.: Металлургия, 1975. — 239 с.
2. Фролов В.Ф., Данченко В.Н., Фролов Я.В. Холодная пильгерная прокатка труб. — Днепропетровск: Пороги, 2005. — 255 с.
3. А. с. 1148660 СССР, МКИ В 21 В 21/00. Рабочая клеть стана холодной прокатки труб / А.С. Ткаченко, С.М. Крышин, В.Ф. Орещенко, Л.А. Сафонов, Ю.Л. Лукашук, В.Т. Вышинский, А.В. Цупкин // Заявл. 20.12.83; опубл. 07.04.85. Бюл. № 13. — 4 с.
4. Калашников Ю.Л., Крышин С.М., Орещенко В.Ф. и др. Разработка новой конструкции нажимного устройства рабочей клетки стана ХПТ с целью повышения качества катаных труб // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1995. № 1. С. 61–63.
5. А. с. 995929 СССР, МКИ В 21 В 21/00. Нажимное устройство стана холодной прокатки труб / А.С. Ткаченко, М.И. Гриншпун, В.Т. Вышинский, Ю.И. Черевик, О.Я. Рабинович, В.Е. Никитенко // Заявл. 03.04.81; опубл. 25.02.83. Бюл. № 6. — 4 с.
6. Попов В.М., Атанасов С.В., Беликов Ю.М. Совершенствование процесса периодической прокатки труб. — Днепропетровск: Дива, 2008. — 191 с.
7. Головченко А.П., Григоренко В.У., Пилипенко С.В. Экспериментальное исследование поперечной разностенности труб при ведении процесса холодной пильгерной прокатки труб с различными сочетаниями выполнения подачи и поворота // Удосконалення процесів і обладнання обробки металів тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. праць. — Краматорськ, 2011. С. 175–178.
8. Пилипенко С.В., Григоренко В.У., Маркевич И.В., Мищенко В.Н. Экспериментальное исследование влияния эллипсной и круглой с выпусками по радиусу форм поперечного сечения ручья калибра стана ХПТ на поперечную разностенность труб // Вісник Сумського державного університету. 2011. № 4. С. 158–164.

Поступила 1 марта 2019 г.

REFERENCES

1. Stoletnii M.F., Klempert E.D. *Tochnost' trub* [Accuracy of pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 239 p. (In Russ.).
2. Frolov V.F., Danchenko V.N., Frolov Ya.V. *Kholodnaya pil'gernaya prokatka trub* [Cold pilger rolling of pipes]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2005, 255 p. (In Russ.).
3. Tkachenko A.S., Kryshin S.M., Oreshchenko V.F., Safonov L.A., Lukashchuk Yu.L., Vyshinskii V.T., Tsupkin A.V. *Rabochaya klet' stana kholodnoi prokatki trub* [A working stand of pipe cold rolling mill]. A.S. USSR no. 1148660. IPC B 21 B 21/00. *Byulleten' izobretenij*, 1985, no. 13. (In Russ.).
4. Kalashnikov Yu.L., Kryshin S.M., Oreshchenko V.F., Safonov L.A., Vyshinskii V.T., Golovachev V.Ya. Development of a new design of the pipe CRM to increase the quality of rolled pipes. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 1995, no. 1, pp. 61–63. (In Russ.).
5. Tkachenko A.S., Grinshpun M.I., Vyshinskii V.T., Cherevik Yu.I., Rabinovich O.Ya., Nikitenko V.E. *Nazhimnoe ustroystvo stana kholodnoi prokatki trub* [An actuator of pipe cold rolling mill]. A.S. USSR no. 995929. IPC B 21 B 21/00. *Byulleten' izobretenij*, 1983, no. 6. (In Russ.).
6. Popov V.M., Atanasov S.V., Belikov Yu.M. *Sovershenstvovanie protsessa periodicheskoi prokatki trub* [Perfection of the pipes periodical rolling process]. Dnepropetrovsk: Diva, 2008, 191 p. (In Russ.).
7. Golovchenko A.P., Grigorenko V.U., Pilipenko S.V. *Eksperymental'noe issledovanie poperechnoi raznostennosti trub pri vedenii protsessu kholodnoi pil'gernoi prokatki trub s razlichnymi sochetaniyami vypolneniya podachi i povorota* [Experimental study of pipes cross different-walled at the pipes cold pilger rolling with various combinations of input and turn perfection]. *Udoskonalennyya protsesiv i obladnannya obrobki metaliv tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'*, Kramatorsk, 2011, pp. 175–178. (In Ukr.).
8. Pilipenko S.V., Grigorenko V.U., Markevich I.V., Mishchenko V.N. Experimental study of elliptic and round with outlet by radius forms of pass cross section of CRM on pipes cross different-walled. *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu*, 2011, no. 4, pp. 158–164. (In Ukr.).

Received March 1, 2019